

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra energetiky

Bakalářská práce

2014

Karel Ševčík

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra energetiky

Měření s elektrostatickými voltmetry
Measuring by Electrostatic Voltmeters

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Karel Ševčík**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: **Měření s elektrostatickými voltmetry**
Measuring by Electrostatic Voltmeters

Zásady pro vypracování:

1. Charakteristika elektrostatických voltmetrů.
2. Vlastnosti přístrojů v laboratoři E122.
3. Ověření třídy přesnosti elektrostatických voltmetrů.

Seznam doporučené odborné literatury:

MACH, Veleslav. Technika vysokého napětí. Ostrava: Skriptum 2. přepracované vydání, ES VŠB-TUO, 2006, 114 s. ISBN 80-248-1161-8

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr. Ing. Veleslav Mach**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 29. 4. 2014

Karel Ševčík *Karel Ševčík*

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu doc. Dr. Ing. Věslavu Machovi za odborné vedení mé bakalářské práce. Za jeho připomínky a konzultace potřebné k vypracování práce.

Abstrakt

První teoretická část se zabývá technickou specifikací, popisem, konstrukcí a vlastnostmi jednotlivých typů voltmetrů, které jsou využívány pro měření vysokého napětí. Ve druhé části jsou popsány konkrétní přístroje z laboratoře techniky vysokého napětí, vlastní měření s jednotlivými přístroji, ověření jejich tříd přesnosti a konstrukce korekčních křivek.

Klíčová slova

Elektrostatický voltmetr, měření, vysoké napětí, LSO 25, S 96, Thrub-Täuber, křivka oprav

Abstract

The first theoretical part deals with the technical specification, description, construction and properties of specific types of voltmeters which are used to measure high voltages. The second part describes the specific device from the technical laboratory of high voltage, the proper measurement of individual devices, verification of their accuracy categories and structures of correction curves.

Key words

Electrostatic voltmeter, measuring, high voltage, LSO 25, S 96, Thrub-Täuber, curve correction

Seznam použitých symbolů a zkratek

A	(m ²)	plocha
C	(F)	kapacita
d	(m)	průměr
E	(V/m)	intenzita
F	(N)	síla
f	(Hz)	frekvence
I_{Nv}	(mA)	proud při vzrůstajícím napětí
I_{Nk}	(mA)	proud při klesajícím napětí
s	(m)	vzdálenost
T	(s)	perioda
U_{NVvyp}	(kV)	vypočtené napětí při vzrůstajícím napětí
U_{NKvyp}	(kV)	vypočtené napětí při klesajícím napětí
U_x	(kV)	napětí nastavované na kontrolovaném voltmetru
V	(m ³)	objem
X_{Kk}	(kV)	korekce při klesajícím napětí
X_{Kv}	(kV)	korekce při vzrůstajícím napětí
X_{Ki}	(kV)	korekce
$X_{Kprû}$	(kV)	průměrná korekce
$X_{Kprû max}$	(kV)	největší hodnota průměrné korekce
X_{Ni}	(kV)	naměřená hodnota veličiny
X_R	(kV)	největší hodnota rozsahu
X_{Si}	(kV)	skutečná hodnota veličiny
Δx_k	(kV)	absolutní chyba při klesajícím napětí
Δx_v	(kV)	absolutní chyba při rostoucím napětí
Δx_i	(kV)	velikost absolutní chyby
ε	(F/m)	permitivita materiálu
δ_X	(%)	relativní chyba
TP		třída přesnosti
TVN		technika vysokých napětí
vn		vysoké napětí

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Teoretická část	2
2.1 Obecná charakteristika elektrostatických voltmetrů.....	2
2.2 Absolutní voltmetry	5
2.2.1 Thomsonovy váhy.....	5
2.2.2 Černyševův voltmetr.....	6
2.3 Voltmetry s přímým odečítáním měřené veličiny	6
2.3.1 Kvadrantový voltmetr	7
2.3.2 Voltmetr Starke-Schröder	8
2.4 Voltmetry s elektrickým přenosem měřené veličiny	9
2.4.1 Voltmetr podle Rogowského a Böckera	9
2.5 Rotační voltmetry.....	10
2.5.1 Válcový rotační voltmetr	12
2.5.2 Kotoučové rotační voltmetry	13
2.6 Vibrační voltmetry.....	14
2.7 Měření stejnosměrného napětí	15
2.8 Měření střídavého napětí.....	15
2.9 Metody používané pro ověřování měřicích přístrojů.....	15
3 Ověření předložených voltmetrů.....	18
3.1 Měření na voltmetru Thrub-Täuber	19
3.2 Měření na voltmetru S 96	25
3.3 Měření na voltmetru LSO 25	29
4 Zhodnocení naměřených výsledků	31
5 Závěr	32
6 Literatura.....	33
7 Seznam obrázků.....	34
8 Seznam tabulek	34
9 Seznam grafů	35

1 Úvod

S rozvojem lidské společnosti se současně vyvíjí i technika. V dnešním moderním světě se využívají pro měření v elektrotechnice především elektronické digitální přístroje, které pomalu nahrazují starší analogové i přes to, že tyto starší analogové přístroje jsou kvalitně zpracovány a měřící s vysokou přesností.

Elektrostatika patří k nejstarším odvětvím elektrotechniky. Když v roce 1831 objevil Michael Faraday elektromagnetickou indukci, zdálo se, že aplikace elektrostatického pole v technice již nebude mít žádné větší výhody. Přepracovaná teorie elektrostatického pole a nové poznatky v oblasti výbojů však vytyčily nový směr vývoje elektrostatických přístrojů.

Vývoj v oblasti techniky vysokých napětí podnítl rozvoj měřících přístrojů, především elektrostatických voltmetrů, pomocí kterých je možné měřit nejvyšší stejnosměrná i střídavá napětí. Některé z těchto přístrojů se vyznačují vysokou přesností a proto se používají na cejchování sériově vyráběných zařízení jako jsou děliče napětí nebo měřicí transformátory. Voltmetry s menší přesností slouží k měření napětí vysokonapěťových zdrojů.

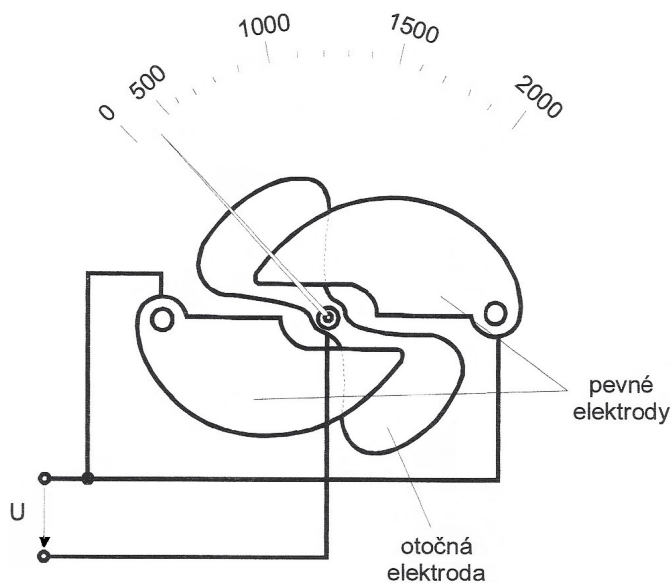
V naší literatuře se nevyskytuje mnoho děl, které se zabývají problematikou elektrostatických strojů a přístrojů. Tato práce se zabývá vlastnostmi a využitím elektrostatických přístrojů, které mohou najít uplatnění v mnoha aplikacích. Zejména se jedná o měření vysokých napětí.

První část mojí práce se zabývá teoretickou charakteristikou elektrostatických voltmetrů využívaných v laboratoři techniky vysokých napětí. Ve druhé části se věnuji praktické aplikaci a využití voltmetrů při měření konkrétní úlohy.

2 Teoretická část

2.1 Obecná charakteristika elektrostatických voltmetrů

Elektrostatické voltmetry využívají pro měření napětí silového účinku elektrostatického pole. Z elektrického pole odebírají malou energii čímž je jejich spotřeba často zanedbatelně malá. Některé typy elektrostatických voltmetrů, zejména rotační voltmetry daný zdroj vůbec nezatěžují a energie potřebná k dosažení výchylky přístroje se odebírá z pomocného zdroje. Měřicí ústrojí elektrostatických voltmetrů je tvořeno soustavou pevných a pohyblivých elektrod. Připojíme-li mezi tyto elektrody napětí, začnou na sebe působit přitažlivou silou a pohyblivé elektrody se začnou natáčet, aby svou co největší plochou zapadly mezi elektrody pevné, viz obr. 1. V okamžiku, kdy dojde k vyrovnání pohybového a direktivního momentu se výchylka přístroje ustálí. Direktivní moment bývá vyvozen závěsem, elektromagnetickým polem, tlakem vzduchu nebo spirálovou pružinou, která současně slouží k přivedení napětí na pohyblivé elektrody. Pro zvýšení pohybového momentu měřicího ústrojí zařazujeme paralelně co nejvíce pevných a pohyblivých elektrod. [1]



Obr. 1 Měřicí ústrojí elektrostatického přístroje [1]

Základní vlastnosti:

- Využívají se k měření stejnosměrných i střídavých napětí do 600 kV
- Běžně vyráběné elektrostatické voltmetry mají třídu přesnosti 1
- Rušivé vlivy způsobené elektrostatickým nábojem lze odstranit vhodným stíněním
- Tyto přístroje jsou velmi jemné a vyžadují jemné zacházení

Po připojení napětí na elektrody vznikají následující jevy:

1. Dvě deskové elektrody tvoří kondenzátor. Připojením napětí se zvětší energie kondenzátoru a silovým účinkem pole dojde k vychýlení elektrody. Elektrická energie se mění na mechanickou energii a energii pole. Sílu, která způsobí vychýlení elektrody o Δs můžeme vyjádřit všeobecným vztahem zapsaným derivací viz (1)

$$F = \frac{dA_e}{ds} = \frac{1}{2} U^2 \cdot \frac{dC}{ds} \quad (1)$$

Vzrůst kapacity dC je způsoben posunutím pohyblivé elektrody. Budeme-li uvažovat, že obě elektrody voltmetru mají stejný průměr d (m) a vzdálenost mezi nimi je s (m). Připojením napětí U (V) vznikne síla

$$F = 3,54 \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{U \cdot d}{s} \right)^2 \cdot 10^{-13} \quad (2)$$

Za předpokladu, že elektrické pole kondenzátoru je homogenní podle vztahu

$$E = \frac{U}{s} \quad (3)$$

Je síla

$$F = 3,54 \cdot \varepsilon \cdot E^2 \cdot d^2 \cdot 10^{-13} \quad (4)$$

Pro vzduch je $\varepsilon = 1$ a E může dosáhnout hodnoty 2,5 MV/m, dostaneme maximální sílu, která působí na jednotku plochy

$$f = \frac{F}{s} = 3,54 \cdot (2,5 \cdot 10^6)^2 \cdot 10^{-13} \cdot \frac{4}{\pi} = 2,82 \text{ kg/m}^2 \quad (5)$$

To znamená, že síla působící na jednotku plochy je na volném vzduchu malá. Zvýšením tlaku úměrně roste i přípustná intenzita pole a síla roste kvadraticky.

Elektrody voltmetru mohou být vloženy do prostředí s vyšší dielektrickou konstantou. Úměrně vzrostou dielektrické konstanty, vzroste přitažlivá síla podle vztahu (2). Ponořením voltmetru do oleje ($\epsilon = 2,2$) vzroste síla na 2,2násobek původní hodnoty. Průrazná pevnost oleje je několikrát vyšší než průraznost vzduchu, pro stejnou hodnotu napětí může být menší vzdálenost s , čímž vzroste síla působící na pohyblivou elektrodu.

2. Za předpokladu, že v homogenním poli $E = f(x)$ se nachází kovové těleso o objemu V . Síla, která působí ve směru intenzity pole (ve směru x), je dána vztahem

$$F = \frac{\epsilon}{2} \cdot \frac{d[f(x)]^2}{dx} \cdot V \quad (6)$$

Na malou kouli s nábojem $+Q$ umístěnou v elektrickém poli o intenzitě E , působí síla ve směru intenzity pole

$$\overline{F} = Q \cdot \overline{E} \quad (7)$$

Při navrhování elektrostatických voltmetrů je potřeba se řídit výše uvedenými vztahy. Hlavní podmínkou správné činnosti voltmetru je, že při měření nesmí vznikat výboje, protože jejich prostorový náboj silně deformuje původní pole a přesnost měření se sníží. Proto musí být všechny části voltmetru, především elektrody, zaoblené takovým způsobem, který zabezpečuje bezvýbojový provoz.

U měření velmi vysokých napětí lze tyto podmínky těžko dodržovat, protože elektrody u těchto přístrojů mají velké rozměry. Přístroje jsou těžké a nepřenositelné. Z těchto důvodů se voltmetry umísťují do tlakového prostředí, ve kterém je dielektrikum plyn. Z hlediska elektrické průraznosti, stálosti a chemické neutrality jsou na plyn kladeny vysoké nároky. Případnými výboji se plyn nesmí rozkládat na složky, které působí korozivně na součástky přístroje. Na tyto účely se nejčastěji používá dusík a kysličník uhličitý.

Jiný způsob jak zvýšit intenzitu pole je použití oleje. Transformátorový olej má velmi dobré elektrické vlastnosti, elektrickou pevnost až 20 MV/cm a dobrou stálost. Dielektrická konstanta oleje je 2,2krát vyšší než u vzduchu, čímž se zvýší síla působící na elektrodu.

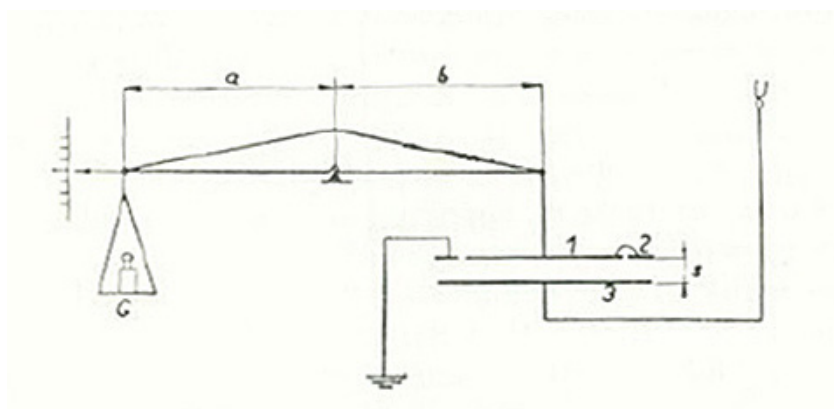
Od oleje vyžadujeme podobné vlastnosti jako u plynů: vysokou elektrickou pevnost, chemickou stálost a neutralitu. Olej by neměl být navlhavý, aby se nezhoršovala jeho elektrická pevnost. [2]

2.2 Absolutní voltmetry

Absolutní voltmetry nazýváme přístroje, u kterých je možné velikost elektrostatické veličiny určit ze základních fyzikálních veličin např. délky, síly atd. [2]

2.2.1 Thomsonovy váhy

Na jednom rameni vah je zavěšena kruhová elektroda 1 , obklopená uzemněným kovovým prstencem 2 tak, že mezi elektrodou a prstencem je malá mezera. Ve vzdálenosti s od elektrody je vysokonapěťová elektroda 3 , jejíž průměr je stejný jako průměr prstence. Přivedením napětí U na přístroj se vytvoří elektrické pole, které je mezi elektrodami 1 a 3 homogenní. Protože je první elektroda 1 obklopená prstencem neprojevuje se deformace elektrického pole na okraji kondenzátoru. Silové účinky elektrického pole jsou vyváženy na druhém rameni silou G . [2]

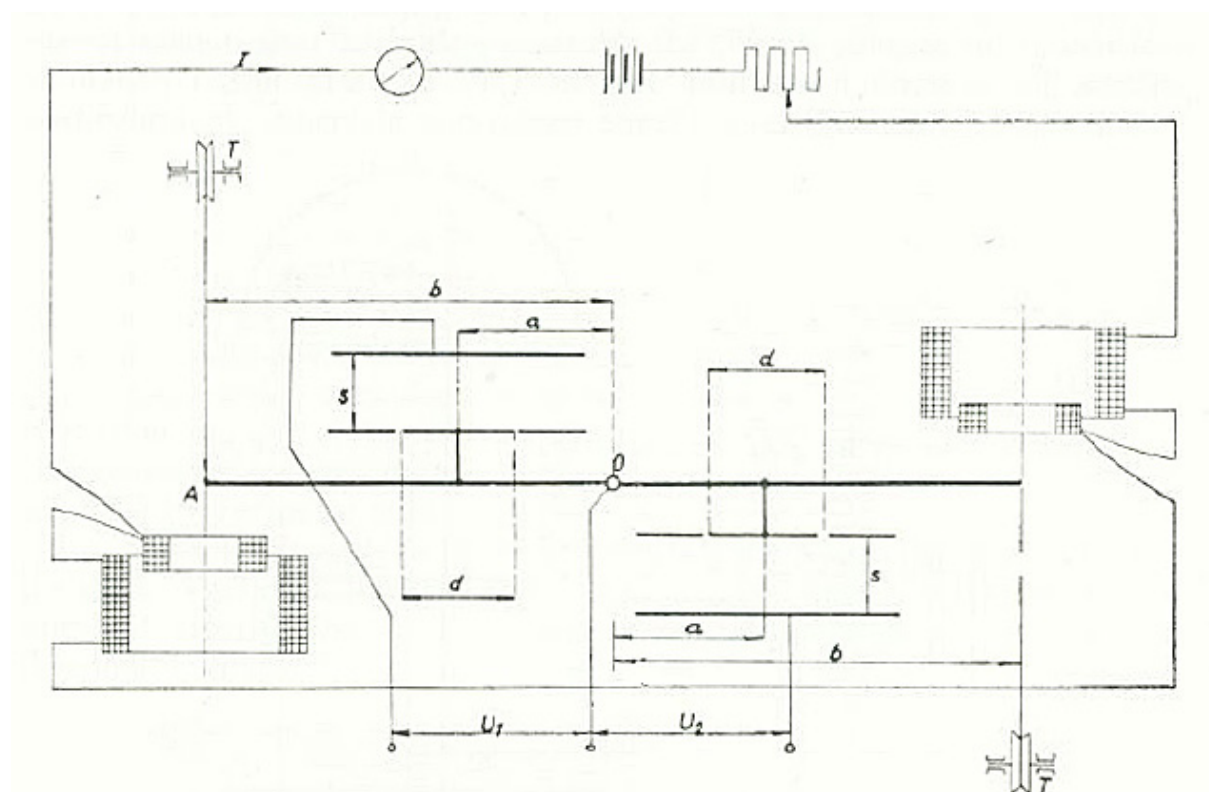


Obr. 2 Thomsonovy váhy [2]

2.2.2 Černyševův voltmetr

Vyvažování měřeného napětí je zdlouhavé a nepohodlné. V průběhu měření se napětí nesmí měnit. Direktivní síla je vyvolaná elektromagnetickým polem dvojice cívek bez železného jádra, kterými protéká stejnosměrný proud. Přitažlivá síla mezi cívkami je úměrná čtverci proudu, který jimi protéká. Protože i přitažlivá síla mezi elektrodami závisí kvadraticky na měřeném napětí, vzájemný vztah mezi proudem a napětím je lineární. Ampérmetr zapojený v obvodu cívek je cejchovaný přímo v kV. Před prvním měřením je nutné ampérmetr ocejchovat pomocí známého závaží.

Tyto přístroje měří jak symetrická tak nesymetrická napětí. Přesnost u přístrojů pro měření 300 kV se pohybuje okolo $\pm 0,4 \%$. [2]



Obr. 3 Černyševův voltmetr [2]

2.3 Voltmetry s přímým odečítáním měřené veličiny

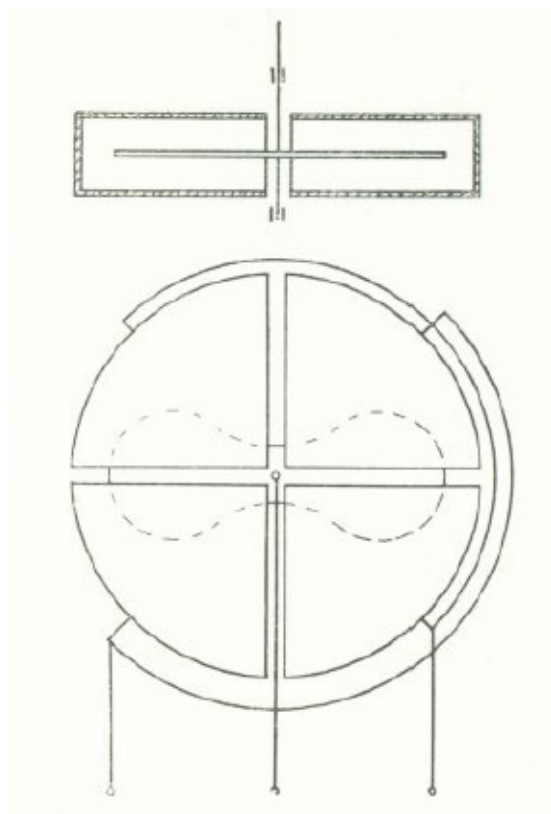
Z důvodu zdlouhavé manipulace se absolutní voltmetry používají pouze pro cejchování jiných elektrostatických voltmetrů. Tyto voltmetry indikují pomocí výchylky ručky nebo jiným způsobem přímo měřené napětí. Nejčastěji se používají ručkové elektrostatické voltmetry. Jsou vhodné pro měření vysokých stejnosměrných i střídavých napětí a vysokofrekvenčních napětí. Jejich přesnost se pohybuje v rozmezí $1 \div 5 \%$. [2]

2.3.1 Kvadrantový voltmetr

Pro měření nižších hodnot napětí se používají kvadrantové voltmetry. Nepohyblivá část voltmetru je složena ze čtyř kvadrantů, které mohou být zapojeny rozdílným způsobem. Nejčastější je *idiostatické* zapojení, při kterém jsou dva protikladné kvadranty a otočná elektroda uzemněny a měřené napětí se přivádí na zbylé dva kvadranty. Stupnice přístroje je kvadratická, protože otočný moment je úměrný čtverci připojeného napětí. Direktivní moment vyvolává malá pružinka. Tlumení přístroje se řeší téměř vždy vířivými proudy.

Rozsah měřených napětí u těchto přístrojů se pohybuje od několika stovek voltů do jednotek kilovoltů. Pro vyšší napětí v řádech desítek kilovoltů musí být vzdálenost mezi kvadranty velmi velká. Z tohoto důvodu se napětí přivádí na elektrodu, která má odlišný tvar vzhledem k nejrovnoměrnějšímu charakteru stupnice.

Působením elektrostatických sil se k této elektrodě přitahuje pohyblivá elektroda, spojená s ručičkou přístroje přímo nebo přes převodový mechanismus. Tvar elektrody je ovlivněn stupnicí. Vhodným tvarem obou elektrod lze dosáhnout toho, že kvadratický charakter se upraví na prakticky lineární. [2]



Obr. 4 Kvadrantový voltmetr [2]

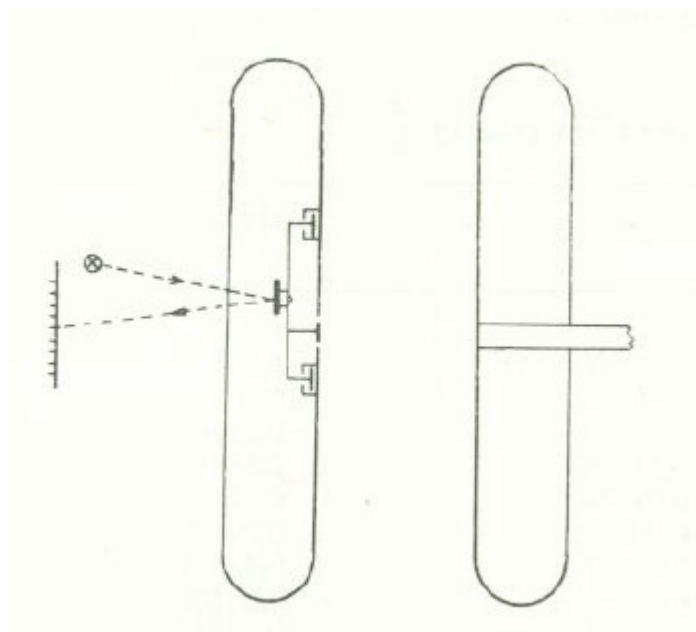
2.3.2 Voltmetr Starke-Schröder

Pro napětí nad 30 kV vycházejí rozměry přístroje už příliš velké na to, aby se jejich tvar mohl řešit stejně jako u běžných laboratorních přístrojů. S ohledem na vysoké napětí je manipulace s nimi choulostivá a nebezpečná.

Rozsah absolutních voltmetrů se mění změnou vzdálenosti elektrod. Tvar elektrod však musí být takový, aby přitom nedošlo ke kvalitativní změně elektrostatického pole, v takovém případě by musel mít voltmetr pro každý rozsah jinou stupnici. Voltmetr Starke-Schröder řeší problém diskovými elektrodami velkého průměru, které se nastavují v rozsahu $(0,2 - 0,6) d$ (viz obr. 5). Ve středu uzemněné elektrody je kruhový otvor, ve kterém je pohyblivě uložený malý kotouč. Protože průměr elektrod je o mnoho větší než jejich vzdálenost, průběh elektrického pole v okolí kotouče je homogenní.

Síla, která působí na kotouč, je úměrná intenzitě elektrostatického pole. Výchylka kotouče se nezmění při zvýšení napětí, např. na n -násobek, zvětšíme úměrně i vzdálenost elektrod s . Samotné vychýlení kotouče z roviny elektrod však nesmí vyvolat zvýšení intenzity pole, proto musí být výchylka malá. Přesně se odečítá pomocí výchylky světelné stopy odražené zrcadlem, které je přichyceno na kotouči. Direktivní moment vyvolává torzně namáhané bronzové vlákno.

Přesnost přístroje je lepší než 1 % při vzdálenosti elektrod menší jako polovina průměru elektrod. Při větší vzdálenosti dochází k deformaci elektrostatického pole a silně se projevují účinky cizích polí. [2]



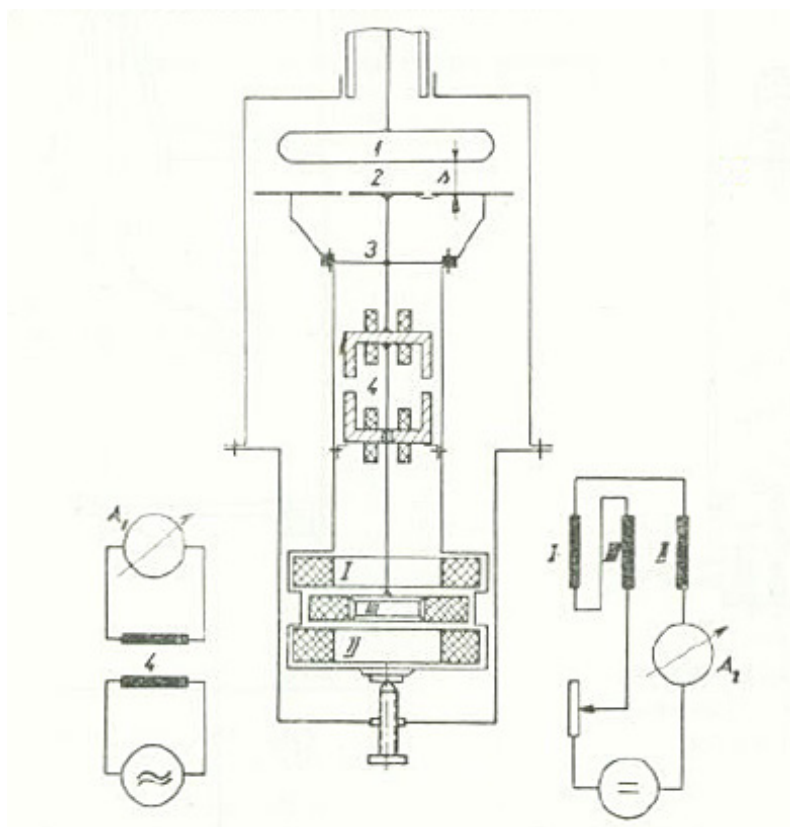
Obr. 5 Voltmetr Starke-Schröder [2]

2.4 Voltmetry s elektrickým přenosem měřené veličiny

Přímé odečítání výchylky vysokonapětových elektrostatických voltmetrů má výhodu jednoduché manipulace, ale nevýhodu, že při odečítání vyšších napětí už musí být pozorovatel kvůli bezpečnosti značně vzdálen od přístroje. [2]

2.4.1 Voltmetr podle Rogowského a Böckera

U tohoto voltmetru je výchylka přenášena podle obr. 6 elektrickou cestou do měřicího přístroje, vzdáleného od samotného voltmetru.



Obr. 6 Voltmetr Rogowského a Böckera [2]

Vysoké napětí se přenáší na deskovou elektrodou 1 průchodkou. Naproti elektrodě 1 je uzemněná měřicí elektroda 2, která je obklopena stínícím prstenem. Vychýlením elektrody 2 se prohne membrána 3 a nadzdvihne se jádro malého transformátoru se sekundárním vinutím, čímž vzroste vzduchová mezera v jeho magnetickém obvodu. Tím se sníží výchylka ampérmetru zařazeného do sekundárního obvodu transformátoru. Primární vinutí je napájeno konstantním střídavým proudem. Změna výchylky ampérmetru je úměrná změně vzduchové mezery. Ve spodní části voltmetru jsou tři cívky. Střední je připevněná k pohyblivému systému, krajní cívky jsou pevné. Všechny tři cívky jsou zapojeny do série na zdroj stejnosměrného napětí.

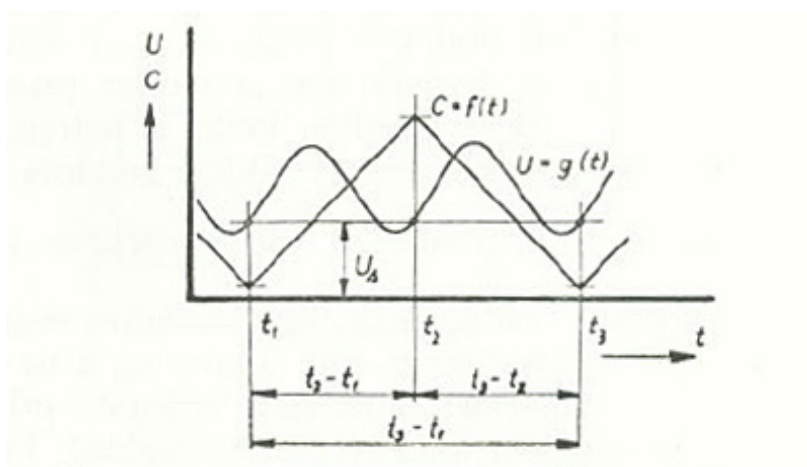
Silovým působením magnetického pole se střední cívka vychýlí směrem dolů. Vychylující síla je úměrná čtverci proudu, který protéká obvodem. Protože i síla, která vychyluje měřicí elektrodu závisí na čtverci připojeného napětí, je vzájemný vztah mezi připojeným měřeným napětím a proudem v cívkách lineární. Při měření se proud mění dokud nenastane rovnováha sil, to znamená dokud se elektroda 2 nevrátí do původní polohy. Změnu proudu můžeme sledovat podle výchylky ampérmetru A_2 v obvodu transformátoru 4.

Při měření střídavých napětí je potřeba dbát na to, aby mechanický kmitočet systému nebyl v rezonanci s kmitočtem měřeného napětí. Primární vinutí transformátoru 4 se proto napájí vyšším kmitočtem.

Voltmetr pracuje v tlakovém prostředí. Rozsah přístroje se mění posouváním celého vnitřního mechanismu. Protože tvar elektrického pole se při změně vzdálenosti s příliš nezmění, průběh stupnice zůstává zachovaný a změní se pouze konstanta přístroje. Přesnost výše popsaného voltmetru je $\pm 0,5 \%$. [2]

2.5 Rotační voltmetry

Samostatnou skupinu elektrostatických voltmetrů tvoří *rotační voltmetry*. Jejich činnost není na rozdíl od výše popsaných voltmetrů založena na silových účincích elektrického pole. Pro měření napětí využívají *elektrostatickou indukci*. Tyto voltmetry se používají pro měření stejnosměrných i střídavých napětí nejvyšších hodnot přesahujících hodnoty MV. Podobně jako elektrostatické přístroje nemají rotační voltmetry vlastní spotřebu a tím nezatěžují zdroj napětí, což je výhodné u zdrojů s malým výkonem jako jsou např. elektrostatické generátory. Pro svoje výhody se používají v laboratořích vysokých napětí. Rotační voltmetry se používají i v meteorologii, kdy se s jejich pomocí měří intenzita elektrického pole Země.



Obr. 7 Časový průběh kapacity a napětí rotačního voltmetru [2]

Na obr. 7 máme zobrazený časový průběh kapacity a napětí rotačního voltmetru. Časový úsek volíme tak, aby měřené napětí mělo v čase t_1 a t_2 stejnou hodnotu, tedy $U_1 = U_2$. Při měření stejnosměrného napětí je tato podmínka automaticky splněna, při měření střídavého napětí musíme volit interval vzhledem k frekvenci měřeného napětí tak, aby za interval proběhla právě jedna perioda připojeného napětí, musí platit

$$T = \frac{1}{f} = t_1 - t_2 \quad (8)$$

kde f - frekvence

T - doba kmitu

Z průběhu můžeme vidět, že frekvence změny kapacity je poloviční z frekvence měřeného napětí a platí

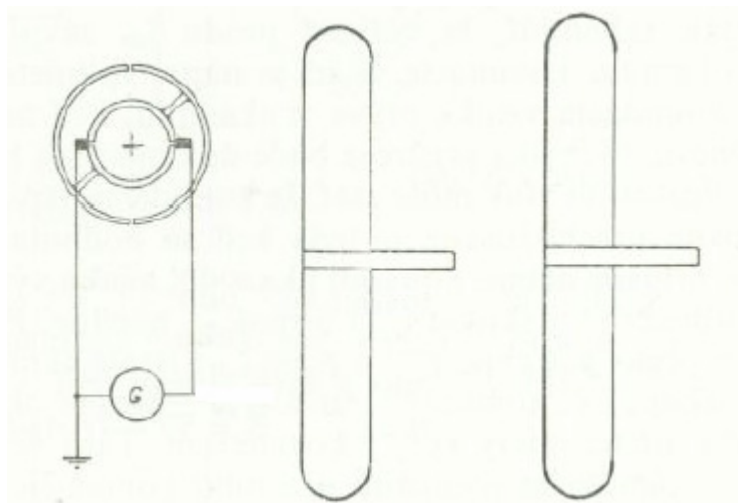
$$f = 2f_c \text{ nebo } T = \frac{T_c}{2} \quad (9)$$

Rotační voltmetry mají následující vlastnosti:

- Výchylka měřicího článku rotačního voltmetru je přímo úměrná měřenému napětí. (elektrostatické přístroje mají kvadratickou závislost)
- Rotačním voltmetrem můžeme měřit stejnosměrné i střídavé napětí tehdy, kdy změna kapacity je synchronní se změnou napětí podle vztahu $f = 2f_c$. Frekvence měřeného napětí musí být dvojnásobná jako frekvence změny kapacity. Z toho vyplývá, že pohonný motor musí být čtyřpólový.
- Protože hodnota i_{str} je závislá na hodnotě napětí na začátku a konci intervalu $t_2 - t_1$, při dvojkvadrantovém voltmetru na hodnotě napětí v okamžiku komutace, vzájemným časovým posouváním průběhu C a U je možné zjistit tvar vlny napětí.
- Rotační voltmetry nezatěžují zdroj napětí, protože příkon potřebný na vychýlení měřicího systému přístroje dodává pohonný motor, který otáčí elektrodami voltmetru. Rotační voltmetr je v podstatě elektrostatický generátor. V zahraniční literatuře se můžeme setkat s označením *generátorový voltmetr* nebo *indukční voltmetr*.

2.5.1 Válcový rotační voltmetr

V elektrickém poli dvou deskových elektrod se otáčí kovový válec, poháněný synchronním motorem (viz obr. 8). Válec, který má osu rovnoběžnou s povrchem deskových elektrod je podélně rozřezaný na dvě poloviny. Každá z nich je připojena na jednu lamelu komutátoru, který je ve funkci spínače. Rovina řezu válce je vzhledem k rovině komutátoru pootočená o 90° . Na uhlíky komutátoru je připojený jednopólově uzemněný ampérmetr (galvanometr). Při otáčení má vždy jeden půlválec potenciál země a to až do okamžiku komutace. Po komutaci je kapacita půlválce vzhledem k elektrodě největší. Otáčením kapacita postupně klesá až na minimální hodnotu a náboj se odvádí přes lamelu komutátoru do galvanometru. V okamžiku poklesu kapacity na minimální hodnotu se na druhý obvod připojí druhý, doposud uzemněný půlválec, který má v daném okamžiku největší kapacitu.



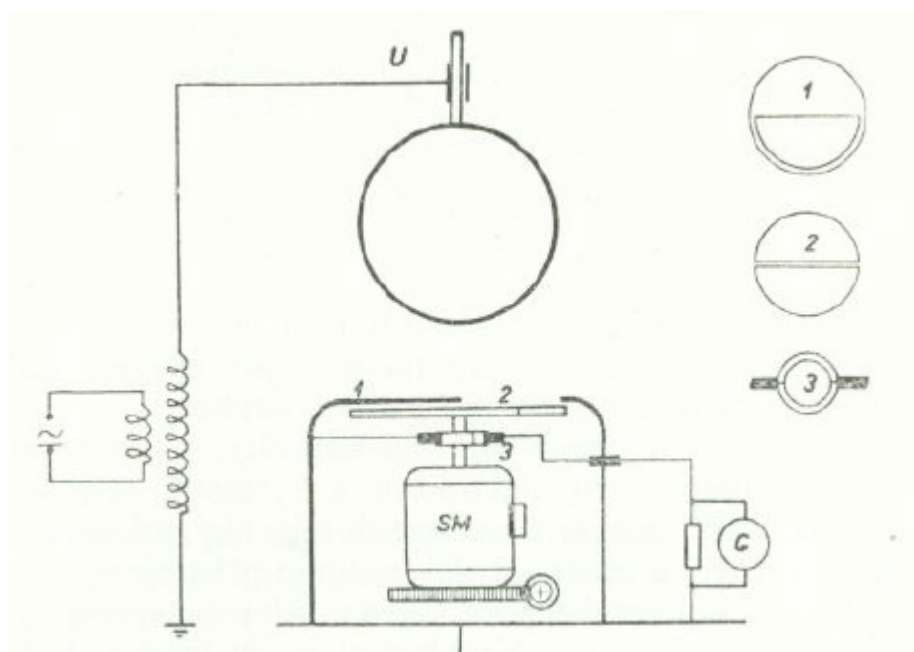
Obr. 8 Válcový rotační voltmetr [2]

2.5.2 Kotoučové rotační voltmetry

Kotoučové voltmetry jsou konstrukčně jednodušší než válcové voltmetry. Používají se v různých aplikacích pro měření nejvyšších stejnosměrných napětí, často v talkovém prostředí. Princip činnosti je stejný jako u válcového rotačního voltmetru.

Napětí se přivádí na kulovou elektrodu I , která je zavěšena na kalibrovaném závitu. Spodní část tvoří čtyřpólový synchronní motor, provedený tak, že jeho stator se může pootáčet na dálku přes slimákový převod. Na hřídeli motoru je dvojlamelový komutátor a izolovaně přichycený kovový disk, rozdělený na poloviny (viz obr. 9). Celá spodní část voltmetru je v kovovém krytu, na kterém je půlkruhový otvor, přesně nad diskem. Vzájemná poloha otvoru, půldisku a komutátoru je znázorněna v horním rohu obrázku. Při otáčení se půldisky dostávají střídavě pod výřez, to znamená pod vliv elektrického pole. Komutace vzniká v okamžiku, kdy jeden z půldisků je právě pod výřezem, tehdy je jeho kapacita největší. V době půlotáčky klesne kapacita z maximální hodnoty na minimální a náboj se odvede přes komutátor do galvanometru. Druhý půldisk je zatím uzemněný. V momentu kdy se druhý půldisk dostane pod výřez, první se uzemní a náboj se začne odvádět z druhého.

Rozsah přístroje je možné měnit změnou kapacity, tzn. změnou vzdálenosti mezi vysokonapěťovou elektrodou a půldiskem. Vzdálenost musí být nastavena tak, aby při daném rozsahu nemohlo dojít k přeskoku mezi vn elektrodou a přístrojem. [2]

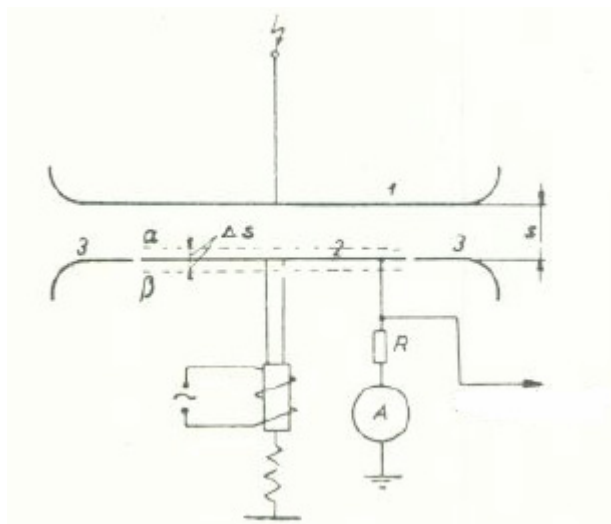


Obr. 9 Kotoučový rotační voltmetr [2]

2.6 Vibrační voltmetry

Samostatným druhem voltmetrů s pohybující se elektrodou jsou *vibrační voltmetry*. Změna kapacity je u vibračních voltmetrů vyvolána kmitavým pohybem měřicí elektrody směrem k vysokonapěťové elektrodě. Tyto přístroje jsou vhodné pouze na měření stejnosměrných vysokých napětí.

Principiální schéma je na obr. 10. Měřené napětí se přivádí na elektrodu 1. Naproti této elektrodě ve vzdálenosti s je měřicí elektroda 2, obklopená uzemněným mezikružím 3. Měřicí elektroda je přichycena k jádru, které prochází cívkou elektromagnetu napájeného střídavým proudem. Direktivní sílu vyvolává pružina pod elektromagnetem. Ve vypnutém stavu leží měřicí elektroda v rovině mezikružím 3, po zapojení kmitá z polohy α do polohy β . Její vysunutí z neutrální polohy označujeme Δs .



Obr. 10 Vibrační voltmetr [2]

Vibrační voltmetry mají oproti rotačním nevýhody. U rotačních voltmetrů je kruhový pohyb měřicí elektrody přesně daný otáčkami, amplituda kmitání vibračních voltmetrů není konstantní a je závislá na silových účincích elektrického pole, tedy na připojeném napětí U . Při vyšším napětí U nebo menší vzdálenosti s působí na plochu elektrody 2 větší síla, která deformuje původní režim kmitání tak, že výchylka Δs je ve směru α větší než ve směru β . Celková výchylka $2\Delta s$ zůstane nezměněná, změní se kapacita C_0 , tj. kapacita mezi elektrodami 1 a 2 v neutrálním stavu. Další velkou nevýhodou vibračních voltmetrů je jejich nepříjemná hlučnost. [2]

2.7 Měření stejnosměrného napětí

Pro měření stejnosměrného napětí používáme nejčastěji *magnetoelektrické* voltmetry, které lze použít pro měření stejnosměrného napětí v rozmezí od několika set mV do 1000 V.

Magnetoelektrické voltmetry se vyznačují vysokou přesností (běžně 0,5) a malou spotřebou. U běžných magnetoelektrických voltmetrů bývá vnitřní odpor $r_i = 5000 \Omega/V$. Má-li však voltmetr velký vnitřní odpor, protéká měřicí cívkou velmi malý proud, přístroj má malý pohybový moment a klesá tím i jeho přesnost.

Další měřicí soustava s velmi vysokým vnitřním odporem je soustava *elektrostatická* (její vnitřní odpor je teoreticky nekonečný). Elektrostatické voltmetry se v praxi používají pouze v oblasti vysokého napětí. Pro měření běžných napětí o velikosti desítek až stovek voltů se nepoužívají, protože mají velmi malý pohybový moment. [1]

2.8 Měření střídavého napětí

Velikost střídavých periodických napětí se s časem mění a proto tato napětí charakterizujeme pomocí *efektivní*, *střední* nebo *maximální* hodnoty, které jsou u ustáleného střídavého napětí konstantní.

Z praktických důvodů je pro nás nejzajímavější efektivní hodnota napětí, kterou měří např. feromagnetické nebo elektrodynamické přístroje.

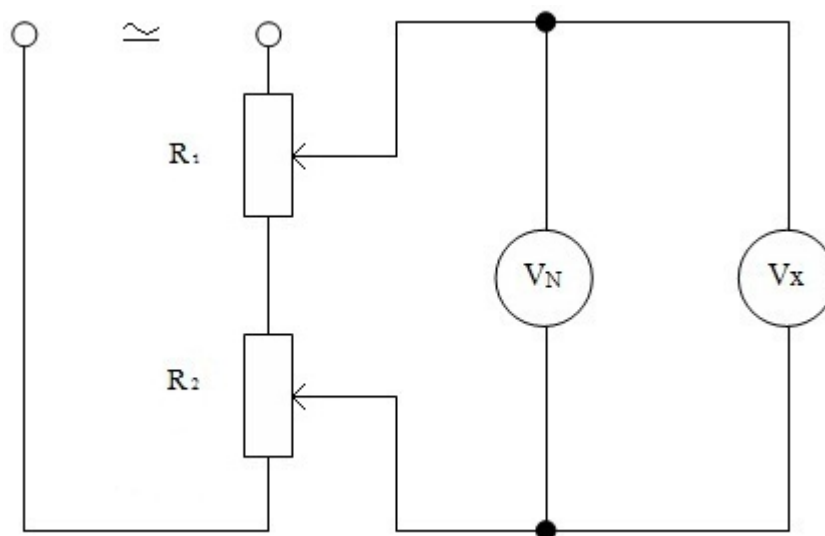
Pro přímé měření vysokých napětí se používají elektrostatické voltmetry. Jejich výhodou je nezávislost výchylky na kmitočtu, proto je lze použít i v oblastech vysokého kmitočtu. Elektrostatické voltmetry udávají efektivní hodnotu napětí. [1]

2.9 Metody používané pro ověřování měřících přístrojů

Pro tuto činnost se rovněž užívá název kontrola. Úkolem této činnosti je získání korekční křivky a třídy přesnosti měřícího přístroje.

Pro ověřování je nutné užít přístrojů, jejichž třída přesnosti je alespoň o dva stupně vyšší a pracovat za podmínek, kdy se neprojevují rušivé vlivy. Kontrola se provádí ve více bodech stupnice při zvyšování i při snižování měřené veličiny.

Ověřování se provádí tak, že na ověřovaném přístroji nastavujeme hodnoty napětí či proudu dle význačných bodů stupnice a na přesném přístroji odečítáme hodnoty skutečné. [1]



Obr. 11 Paralelní připojení přesného voltmetru ke kontrolovanému [1]

Kontrolní i kontrolovaný voltmetr jsou zapojeny paralelně. Napájí se ze stabilizovaného zdroje. Metoda je vhodná pro kontrolu stejnosměrných i střídavých průběhů.

Průběh ověřování měřicích přístrojů se řídí normou ČSN. Při ověřování stejných voltmetrů zároveň se zapojí všechny paralelně. Norma ČSN stanovuje, že přístroje s třídou přesnosti 0,1 až 0,5 se musí ověřovat nejméně v šesti hlavních bodech stupnice u nezahřátého přístroje při zvětšování měřené veličiny a po zahřátí přístroje jeho vlastní spotřebou tzn. při plné výchylce po dobu 30 minut při plynulém zmenšování měřené veličiny.

Přístroje s třídou přesnosti 1 až 5 se kontrolují nejméně ve čtyřech bodech stupnice po vyhřátí vlastní spotřebou za 30 minut na kontrolovaném rozsahu. Pro sestavení korekční křivky si z jednotlivých hlavních neboli význačných bodů kontrolovaného přístroje zjistíme absolutní chybu. Z ní pak vypočteme tzv. korekci. Velikost absolutní chyby určíme ze vztahu

$$\Delta x_i = X_{Ni} - X_{Si} \quad (10)$$

kde Δx_i - velikost absolutní chyby

X_{Ni} - hodnota odečtená z normálového (kontrolního) voltmetru

X_{Si} - hodnota odečtená na ověřovaném voltmetru

Korekci určíme jako záporně vzatou velikost absolutní chyby podle vztahu

$$X_{ki} = -\Delta x_i \quad (11)$$

Velikost korekce vyneseme do grafu, kde jsou na vodorovné ose vyneseny dílky stupnice nebo hodnoty veličiny a na svislé ose korekce. Vynesené body se spojují lomenou čarou. Z korekční křivky zjistíme největší hodnotu korekce $X_{k \max}$ bez ohledu na znaménko. Relativní chybu přístroje pak určíme ze vztahu

$$\delta_X = \frac{|X_{k \max}|}{X_R} \cdot 100 \quad (12)$$

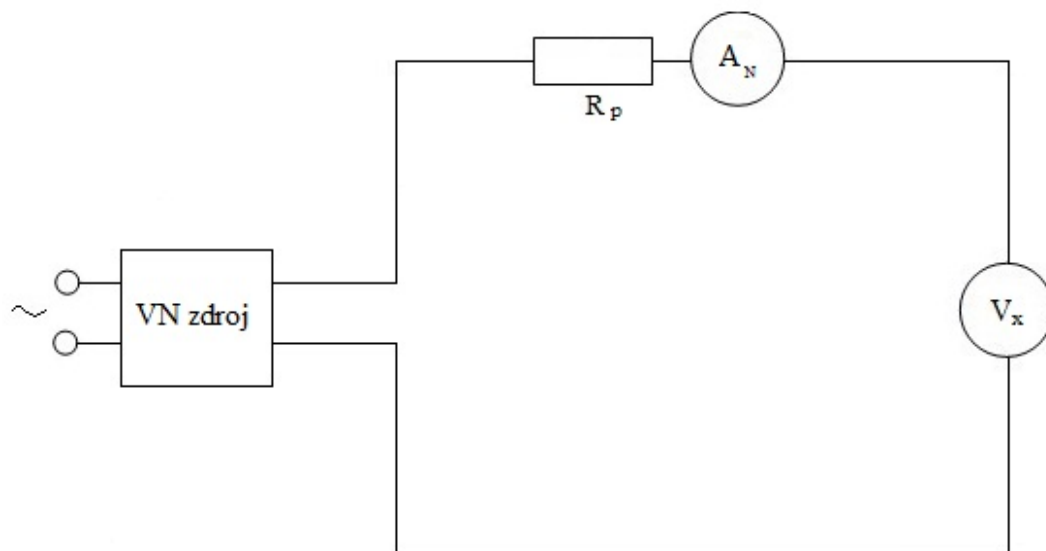
kde $X_{k \max}$ - největší hodnota korekce

X_R - největší hodnota měřicího rozsahu přístroje

$X_{k \max}$ a X_R dosazujeme ve stejných jednotkách tzn. v dílcích nebo jednotkách měřené veličiny. Vypočtenou relativní chybu zaokrouhlujeme na nejbližší vyšší stupeň z řad přesnosti (0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 5). [1]

3 Ověření předložených voltmetrů

Schéma:



Obr. 12 Reálné zapojení ampérmetru a kontrolovaného voltmetru

Podmínky při měření:

Teplota: 21 °C
Tlak: 992 hPa
Vlhkost: 47 %

Použité přístroje:

Vysokonapěťový zdroj v paralelním zapojení - $U_{\max} = 100 \text{ kV}$

$R_p = 17,71 \text{ M}\Omega$ - odpor tvořený čtyřmi skupinami 12 paralelních odporů TR 131 $50 \text{ M}\Omega$ na 15 kV

METEX M-3850 - digitální multimetr pro měření odporové sady TR 131

DU20 - kontrolní ampérmetr

S 96	}	V_x - kontrolované voltmetry
LSO 25		
Thurb - Täuber		

Postup měření:

1. Přístrojem METEX M-3850 změříme hodnoty jednotlivých skupin odporů předřadného odporu R_p .
2. Obvod budeme napájet střídavým napětím z vysokonapěťového zdroje.
3. Po zapnutí obvodu necháme přístroje vyhřát po dobu 30 minut vlastní spotřebou.
4. Na kontrolovaném voltmetru V_X budeme nastavovat hodnoty napětí dle významných bodů stupnice jak pro rostoucí, tak pro klesající hodnoty napětí na všech rozsazích přístroje a na kontrolním ampérmetru A_N budeme odečítat hodnoty proudu.
5. Ze známé hodnoty proudu a předřadného odporu R_p dopočteme velikost napětí U_{Nvyp} .
6. Dopočítáme velikost absolutní chyby, určíme jednotlivé korekce, z nich vypočteme průměrnou korekci.
7. Z největší hodnoty korekce (bez ohledu na znaménko) vypočteme relativní chybu a určíme třídu přesnosti přístroje.

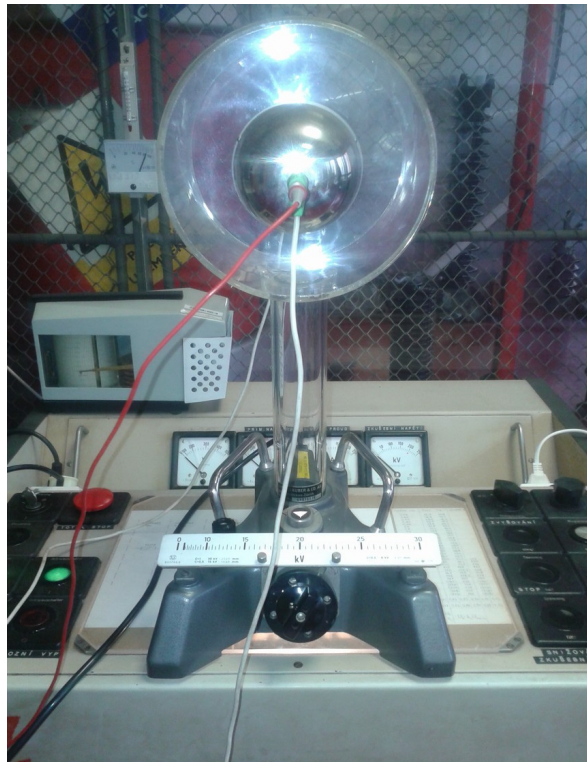
Tabulka č.1: Měření odporů R_p

R	($M\Omega$)
R_1	5,43
R_2	3,93
R_3	4,17
R_4	4,18
R_p	17,71

Výpočet:

$$R_p = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 5,43 + 3,93 + 4,17 + 4,18 = 17,71 M\Omega$$

3.1 Měření na voltmetru Thrub-Täuber



Obr. 13 Voltmetr Thrub-Täuber s rozsahem 30 kV

Charakteristické vlastnosti tohoto voltmetru jsou:

- Měří stejnosměrné i střídavé napětí
- Měřicí rozsah 0 – 30 kV
- Výchylka je zobrazena světelnou stopou
- Voltmetr má tři rozsahy 6 kV; 15 kV; 30 kV
- Číselník má být ve vodorovné poloze
- Měřicí ústrojí je elektrostatické
- Přístroj nemá uvedenou třídu přesnosti a je tedy vhodný pouze pro informativní měření
- Nastavení rozsahů se provádí pomocí přiložených měrek viz obr. 14



Obr. 14 Nastavení rozsahu 6 kV voltmetru Thrub-Täuber

Tabulka č.2: Naměřené hodnoty voltmetru Thrub-Täuber na rozsahu 6 kV

U _x	Švýcarský voltmetr Thrub-Täuber Rozsah 6 kV												
	Měření při napětí												
	vzrůstajícím						klesajícím						X _{Kprů}
	I _{Nv}			U _{NVvyp}	Δx _v	X _{Kv}	I _{Nk}			U _{NKvyp}	Δx _k	X _{Kk}	
(kV)	α	k	(mA)	(kV)	(kV)	(kV)	α	k	(mA)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)
0	0,0	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	5,5	10	0,055	0,97	-0,03	0,03	5,5	10	0,055	0,97	-0,03	0,03	0,03
2	15,0	10	0,150	2,66	0,66	-0,66	15,0	10	0,150	2,66	0,66	-0,66	-0,66
3	22,2	10	0,222	3,93	0,93	-0,93	22,0	10	0,220	3,90	0,90	-0,90	-0,91
4	30,0	0,01	0,300	5,31	1,31	-1,31	31,0	0,01	0,310	5,49	1,49	-1,49	-1,40
5	37,0	0,01	0,370	6,55	1,55	-1,55	36,0	0,01	0,360	6,38	1,38	-1,38	-1,46
6	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Poznámka	Nejvyšší hodnotu rozsahu 6 kV nebylo možné nastavit												

Příklad výpočtu pro 6. řádek tabulky:

$$I_{Nv} = \alpha \cdot k = 37,0 \cdot 0,01 = 0,370 \text{ mA}$$

$$U_{NVvyp} = R_p \cdot I_{NV} = 17,71 \cdot 10^6 \cdot 0,370 \cdot 10^{-3} = 6,55 \text{ kV}$$

$$\Delta x_v = U_{NVvyp} - U_x = 6,55 - 5 = 1,55 \text{ kV}$$

$$X_{Kv} = -\Delta x_v = -1,55 \text{ kV}$$

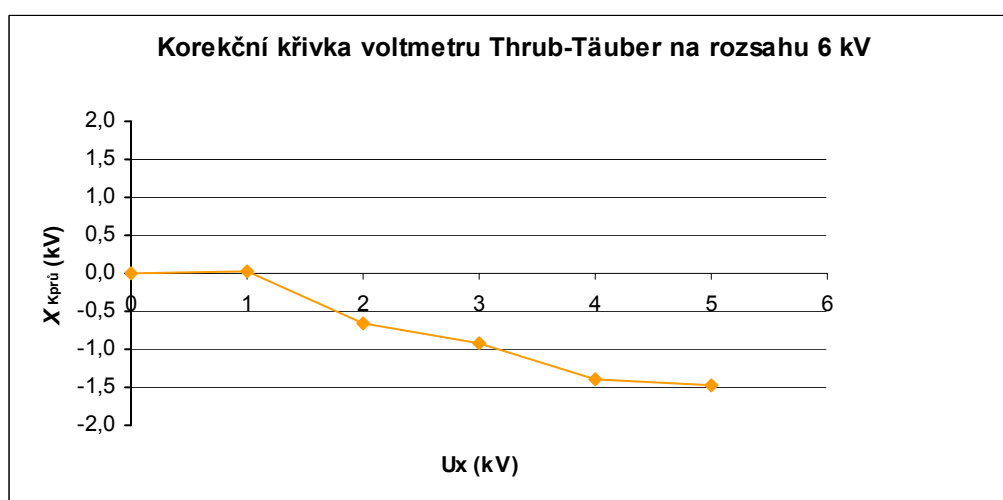
$$I_{Nk} = \alpha \cdot k = 36,0 \cdot 0,01 = 0,360 \text{ mA}$$

$$U_{NKvyp} = R_p \cdot I_{NK} = 17,71 \cdot 10^6 \cdot 0,360 \cdot 10^{-3} = 6,38 \text{ kV}$$

$$\Delta x_k = U_{NKvyp} - U_x = 6,38 - 5 = 1,38 \text{ kV}$$

$$X_{Kk} = -\Delta x_k = -1,38 \text{ kV}$$

$$X_{Kprů} = \frac{X_{Kv} + X_{Kk}}{2} = \frac{-1,55 + (-1,38)}{2} = -1,46 \text{ kV}$$



Graf č.1: Korekční křivka voltmetru Thrub-Täuber na rozsahu 6 kV

Tabulka č.3: Naměřené hodnoty voltmetru Thrub-Täuber na rozsahu 6 kV - druhé měření

U _x	Švýcarský voltmetr Thrub-Täuber Rozsah 6 kV (druhé měření)												
	Měření při napětí												
	vzrůstajícím						klesajícím						X _{Kprů}
	I _{Nv}			U _{NV_{vyp}}	Δx _v	X _{Kv}	I _{Nk}			U _{NK_{vyp}}	Δx _k	X _{Kk}	
(kV)	α	k	(mA)	(kV)	(kV)	(kV)	α	k	(mA)	kV	(kV)	(kV)	(kV)
0	0,0	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	8,0	10	0,080	1,42	0,42	-0,42	7,8	10	0,078	1,38	0,38	-0,38	-0,40
2	15,0	10	0,150	2,66	0,66	-0,66	15,1	10	0,151	2,67	0,67	-0,67	-0,67
3	22,5	10	0,225	3,98	0,98	-0,98	22,5	10	0,225	3,98	0,98	-0,98	-0,98
4	30,0	0,01	0,300	5,31	1,31	-1,31	30,0	0,01	0,300	5,31	1,31	-1,31	-1,31
5	37,0	0,01	0,370	6,55	1,55	-1,55	37,0	0,01	0,370	6,55	1,55	-1,55	-1,55
6	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Poznámka		Nejvyšší hodnotu rozsahu 6 kV nebylo možné nastavit											

Příklad výpočtu pro 6. řádek tabulky:

$$I_{Nv} = \alpha \cdot k = 37,0 \cdot 0,01 = 0,370 \text{ mA}$$

$$U_{NVyp} = R_p \cdot I_{NV} = 17,71 \cdot 10^6 \cdot 0,370 \cdot 10^{-3} = 6,55 \text{ kV}$$

$$\Delta x_v = U_{NVyp} - U_X = 6,55 - 5 = 1,55 \text{ kV}$$

$$X_{Kv} = -\Delta x_v = -1,55 \text{ kV}$$

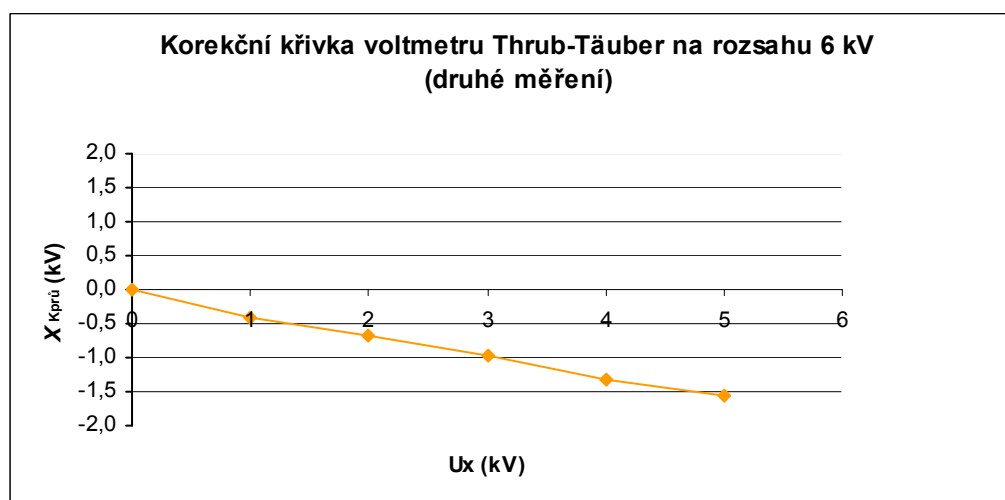
$$I_{Nk} = \alpha \cdot k = 37,0 \cdot 0,01 = 0,370 \text{ mA}$$

$$U_{NKyp} = R_p \cdot I_{NK} = 17,71 \cdot 10^6 \cdot 0,370 \cdot 10^{-3} = 6,55 \text{ kV}$$

$$\Delta x_k = U_{NKyp} - U_X = 6,55 - 5 = 1,55 \text{ kV}$$

$$X_{Kk} = -\Delta x_k = -1,55 \text{ kV}$$

$$X_{Kprů} = \frac{X_{Kv} + X_{Kk}}{2} = \frac{-1,55 + (-1,55)}{2} = -1,55 \text{ kV}$$



Graf č.2: Korekční křivka voltmetru Thrub-Täuber na rozsahu 6 kV - druhé měření

Tabulka č.4: Naměřené hodnoty voltmetru Thrub-Täuber na rozsahu 15 kV

U _x	Švýcarský voltmetr Thrub-Täuber Rozsah 15 kV												
	Měření při napětí												
	vzrůstajícím						klesajícím						X _{Kprů}
	I _{Nv}			U _{NV_{vyp}}	Δx _v	X _{Kv}	I _{Nk}			U _{NK_{vyp}}	Δx _k	X _{Kk}	
(kV)	α	k	(mA)	(kV)	(kV)	(kV)	α	k	(mA)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)
0	0,0	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	34,0	0,01	0,34	6,02	1,02	-1,02	33,0	0,01	0,33	5,84	0,84	-0,84	-0,93
10	66,0	0,01	0,66	11,69	1,69	-1,69	67,0	0,01	0,67	11,87	1,87	-1,87	-1,78
15	9,0	0,1	0,90	15,94	0,94	-0,94	9,0	0,1	0,90	15,94	0,94	-0,94	-0,94

Příklad výpočtu pro 3. řádek tabulky:

$$I_{Nv} = \alpha \cdot k = 66,0 \cdot 0,01 = 0,66 \text{ mA}$$

$$U_{NV_{vyp}} = R_p \cdot I_{NV} = 17,71 \cdot 10^6 \cdot 0,66 \cdot 10^{-3} = 11,69 \text{ kV}$$

$$\Delta x_v = U_{NV_{vyp}} - U_x = 11,69 - 10 = 1,69 \text{ kV}$$

$$X_{Kv} = -\Delta x_v = -1,69 \text{ kV}$$

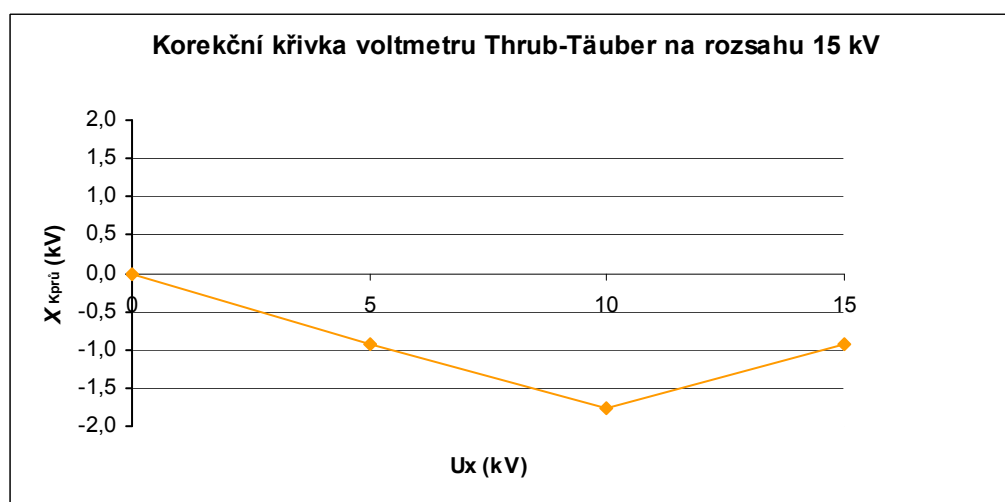
$$I_{Nk} = \alpha \cdot k = 67,0 \cdot 0,01 = 0,67 \text{ mA}$$

$$U_{NK_{vyp}} = R_p \cdot I_{NK} = 17,71 \cdot 10^6 \cdot 0,67 \cdot 10^{-3} = 11,87 \text{ kV}$$

$$\Delta x_k = U_{NK_{vyp}} - U_x = 11,87 - 10 = 1,87 \text{ kV}$$

$$X_{Kk} = -\Delta x_k = -1,87 \text{ kV}$$

$$X_{Kprů} = \frac{X_{Kv} + X_{Kk}}{2} = \frac{-1,69 + (-1,87)}{2} = -1,78 \text{ kV}$$



Graf č.3: Korekční křivka voltmetru Thrub-Täuber na rozsahu 15 kV

Tabulka č.5: Naměřené hodnoty voltmetru Thrub-Täuber na rozsahu 30 kV

U _x	Švýcarský voltmetr Thrub-Täuber Rozsah 30 kV												
	Měření při napětí												
	vzrůstajícím						klesajícím						X _{Kprů}
	I _{Nv}			U _{NVvyp}	Δx _v	X _{Kv}	I _{Nk}			U _{NKvyp}	Δx _k	X _{Kk}	
(kV)	α	k	(mA)	(kV)	(kV)	(kV)	α	k	(mA)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)
0	0,00	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	30,1	0,01	0,301	5,33	0,33	-0,33	31,0	0,01	0,31	5,49	0,49	-0,49	-0,41
10	63,9	0,01	0,639	11,32	1,32	-1,32	63,0	0,01	0,63	11,16	1,16	-1,16	-1,24
15	95,3	0,01	0,953	16,88	1,88	-1,88	96,0	0,01	0,96	17,00	2,00	-2,00	-1,94
20	12,5	0,1	1,25	22,14	2,14	-2,14	12,1	0,1	1,21	21,43	1,43	-1,43	-1,78
25	15,2	0,1	1,52	26,92	1,92	-1,92	15,8	0,1	1,58	27,98	2,98	-2,98	-2,45
30	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Poznámka		Nejvyšší hodnotu rozsahu 30 kV nebylo možné nastavit											

Příklad výpočtu pro 6. řádek tabulky:

$$I_{Nv} = \alpha \cdot k = 15,2 \cdot 0,1 = 1,52 \text{ mA}$$

$$U_{NVvyp} = R_p \cdot I_{NV} = 17,71 \cdot 10^6 \cdot 1,52 \cdot 10^{-3} = 26,92 \text{ kV}$$

$$\Delta x_v = U_{NVvyp} - U_x = 26,92 - 25 = 1,92 \text{ kV}$$

$$X_{Kv} = -\Delta x_v = -1,92 \text{ kV}$$

$$I_{Nk} = \alpha \cdot k = 18,8 \cdot 0,1 = 1,58 \text{ mA}$$

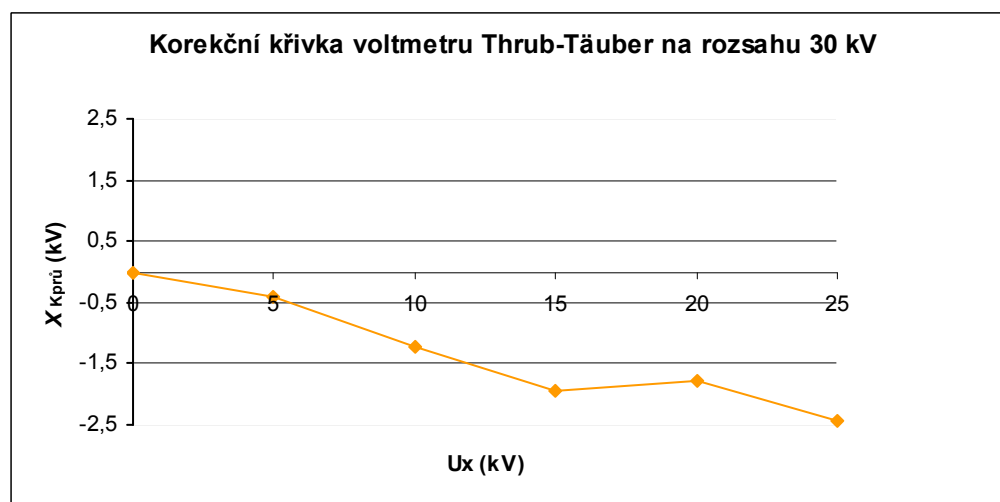
$$U_{NKvyp} = R_p \cdot I_{NK} = 17,71 \cdot 10^6 \cdot 1,58 \cdot 10^{-3} = 27,98 \text{ kV}$$

$$\Delta x_k = U_{NKvyp} - U_x = 27,98 - 25 = 2,98 \text{ kV}$$

$$X_{Kk} = -\Delta x_k = -2,98 \text{ kV}$$

$$X_{Kprů} = \frac{X_{Kv} + X_{Kk}}{2} = \frac{-1,92 + (-2,98)}{2} = -2,45 \text{ kV}$$

$$\delta_X = \frac{|X_{Kprů \max}|}{X_R} \cdot 100 = \frac{|-2,45|}{30} \cdot 100 = 8,16 \% \rightarrow TP > 5$$



Graf č.4: Korekční křivka voltmetru Thrub-Täuber na rozsahu 30 kV

3.2 Měření na voltmetru S 96



Obr. 15 Elektrostatický voltmetr S 96 s rozsahem 30 kV

Charakteristické vlastnosti tohoto voltmetru jsou:

- Měří stejnosměrné i střídavé napětí
- Měřicí rozsah 0 – 30 kV
- Výchylka je zobrazena světelnou stopou
- Voltmetr má tři rozsahy 7,5 kV; 15 kV; 30 kV
- Číselník má být ve vodorovné poloze
- Měřicí ústrojí je elektrostatické se stíněním
- Třída přesnosti pro stejnosměrné i střídavé napětí je 1,5

Tabulka č.6: Naměřené hodnoty voltmetru S 96 na rozsahu 7,5 kV

U _x	S 96 Rozsah 7,5 kV												
	Měření při napětí												
	vzrůstajícím						klesajícím						X _{Kprů}
	I _{Nv}			U _{NVvyp}	Δx _v	X _{Kv}	I _{Nk}			U _{NKvyp}	Δx _k	X _{Kk}	
(kV)	α	k	(mA)	(kV)	(kV)	(kV)	α	k	(mA)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)
0	0,0	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	6,1	10	0,061	1,08	0,08	-0,08	6,0	10	0,060	1,06	0,06	-0,06	-0,07
2	13,5	10	0,135	2,39	0,39	-0,39	12,9	10	0,129	2,28	0,28	-0,28	-0,34
3	18,0	10	0,180	3,19	0,19	-0,19	18,1	10	0,181	3,21	0,21	-0,21	-0,20
4	25,5	0,01	0,255	4,52	0,52	-0,52	25,0	0,01	0,250	4,43	0,43	-0,43	-0,47
5	31,0	0,01	0,310	5,49	0,49	-0,49	31,0	0,01	0,310	5,49	0,49	-0,49	-0,49
6	37,0	0,01	0,370	6,55	0,55	-0,55	37,0	0,01	0,370	6,55	0,55	-0,55	-0,55
7	43,0	0,01	0,430	7,62	0,62	-0,62	43,0	0,01	0,430	7,62	0,62	-0,62	-0,62

Příklad výpočtu pro 8. řádek tabulky:

$$I_{Nv} = \alpha \cdot k = 43,0 \cdot 0,01 = 0,43 \text{ mA}$$

$$U_{NVvyp} = R_p \cdot I_{NV} = 17,71 \cdot 10^6 \cdot 0,43 \cdot 10^{-3} = 7,62 \text{ kV}$$

$$\Delta x_v = U_{NVvyp} - U_x = 7,62 - 7 = 0,62 \text{ kV}$$

$$X_{Kv} = -\Delta x_v = -0,62 \text{ kV}$$

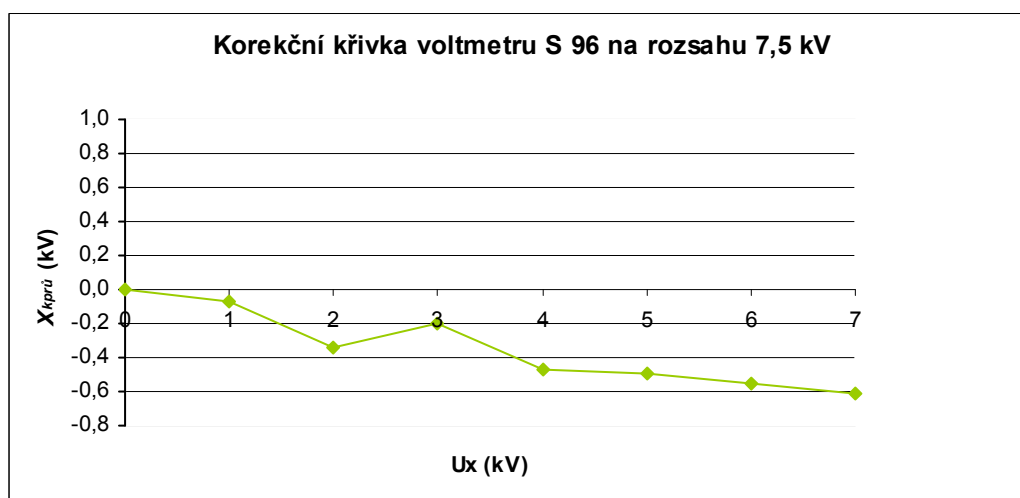
$$I_{Nk} = \alpha \cdot k = 43,0 \cdot 0,01 = 0,430 \text{ mA}$$

$$U_{NKvyp} = R_p \cdot I_{NK} = 17,71 \cdot 10^6 \cdot 0,430 \cdot 10^{-3} = 6,55 \text{ kV}$$

$$\Delta x_k = U_{NKvyp} - U_x = 6,55 - 7 = -0,45 \text{ kV}$$

$$X_{Kk} = -\Delta x_k = 0,45 \text{ kV}$$

$$X_{Kprů} = \frac{X_{Kv} + X_{Kk}}{2} = \frac{-0,62 + (-0,62)}{2} = -0,62 \text{ kV}$$



Graf č.5: Korekční křivka voltmetru S 96 na rozsahu 7,5 kV

Tabulka č.7: Naměřené hodnoty voltmetru S 96 na rozsahu 15 kV

Voltmetr S 96 Rozsah 15 kV													
U _x	Měření při napětí												
	vzrůstajícím						klesajícím						X _{Kprů}
	I _{Nv}			U _{NV_{vy}p}	Δx _v	X _{Kv}	I _{Nk}			U _{NK_{vy}p}	Δx _k	X _{Kk}	
	(kV)	α	k	(mA)	(kV)	(kV)	α	k	(mA)	(kV)	(kV)	(kV)	
0	0,0	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	18,2	10	0,182	3,22	0,22	-0,22	18,9	10	0,189	3,35	0,35	-0,35	-0,29
6	37,9	0,01	0,379	6,71	0,71	-0,71	37,7	0,01	0,377	6,68	0,68	-0,68	-0,69
9	56,5	0,01	0,565	10,01	1,01	-1,01	56,2	0,01	0,562	9,95	0,95	-0,95	-0,98
12	7,5	0,1	0,750	13,28	1,28	-1,28	7,4	0,1	0,740	13,11	1,11	-1,11	-1,19
15	9,3	0,1	0,930	16,47	1,47	-1,47	9,3	0,1	0,930	16,47	1,47	-1,47	-1,47

Příklad výpočtu pro 6. řádek tabulky:

$$I_{Nv} = \alpha \cdot k = 9,3 \cdot 0,1 = 0,930 \text{ mA}$$

$$U_{NV_{vy}p} = R_p \cdot I_{NV} = 17,71 \cdot 10^6 \cdot 0,930 \cdot 10^{-3} = 16,47 \text{ kV}$$

$$\Delta x_v = U_{NV_{vy}p} - U_X = 16,47 - 15 = 1,47 \text{ kV}$$

$$X_{Kv} = -\Delta x_v = -1,47 \text{ kV}$$

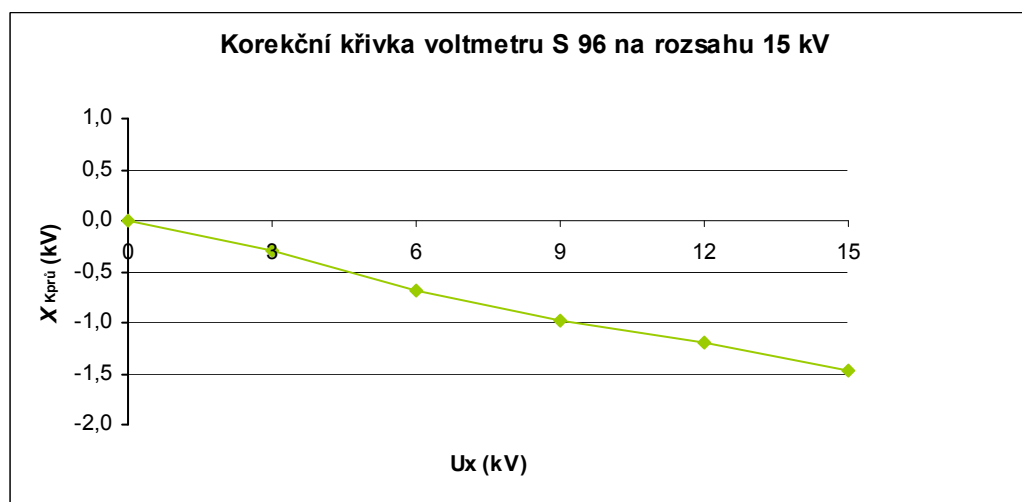
$$I_{Nk} = \alpha \cdot k = 9,3 \cdot 0,1 = 0,930 \text{ mA}$$

$$U_{NK_{vy}p} = R_p \cdot I_{NK} = 17,71 \cdot 10^6 \cdot 0,930 \cdot 10^{-3} = 16,47 \text{ kV}$$

$$\Delta x_k = U_{NK_{vy}p} - U_X = 16,47 - 15 = 1,47 \text{ kV}$$

$$X_{Kk} = -\Delta x_k = -1,47 \text{ kV}$$

$$X_{Kprů} = \frac{X_{Kv} + X_{Kk}}{2} = \frac{-1,47 + (-1,47)}{2} = -1,47 \text{ kV}$$



Graf č.6: Korekční křivka voltmetru S 96 na rozsahu 15 kV

Tabulka č.8: Naměřené hodnoty voltmetru S 96 na rozsahu 30 kV

U _x	Voltmetr S 96 Rozsah 30 kV												
	Měření při napětí												
	vzrůstajícím						klesajícím						X _{Kprů}
	I _{Nv}			U _{Nv_{vy}p}	Δx _v	X _{Kv}	I _{Nk}			U _{NK_{vy}p}	Δx _k	X _{Kk}	
(kV)	α	k	(mA)	(kV)	(kV)	(kV)	α	k	(mA)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)
0	0,0	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	30,2	0,01	0,302	5,35	0,35	-0,35	30,5	0,01	0,305	5,40	0,40	-0,40	-0,37
10	66,0	0,01	0,660	11,69	1,69	-1,69	65,2	0,01	0,652	11,55	1,55	-1,55	-1,62
15	95,7	0,01	0,957	16,95	1,95	-1,95	96,0	0,01	0,960	17,00	2,00	-2,00	-1,98
20	12,2	0,1	1,220	21,61	1,61	-1,61	12,5	0,1	1,250	22,14	2,14	-2,14	-1,87
25	15,1	0,1	1,510	26,74	1,74	-1,74	15,1	0,1	1,510	26,74	1,74	-1,74	-1,74
30	18,0	0,1	1,800	31,88	1,88	-1,88	17,6	0,1	1,760	31,17	1,17	-1,17	-1,52

Příklad výpočtu pro 4. řádek tabulky:

$$I_{Nv} = \alpha \cdot k = 95,70 \cdot 0,01 = 0,957 \text{ mA}$$

$$U_{NV_{vy}p} = R_p \cdot I_{NV} = 17,71 \cdot 10^6 \cdot 0,957 \cdot 10^{-3} = 16,95 \text{ kV}$$

$$\Delta x_v = U_{NV_{vy}p} - U_x = 16,95 - 15 = 1,95 \text{ kV}$$

$$X_{Kv} = -\Delta x_v = -1,95 \text{ kV}$$

$$I_{Nk} = \alpha \cdot k = 96,0 \cdot 0,01 = 0,960 \text{ mA}$$

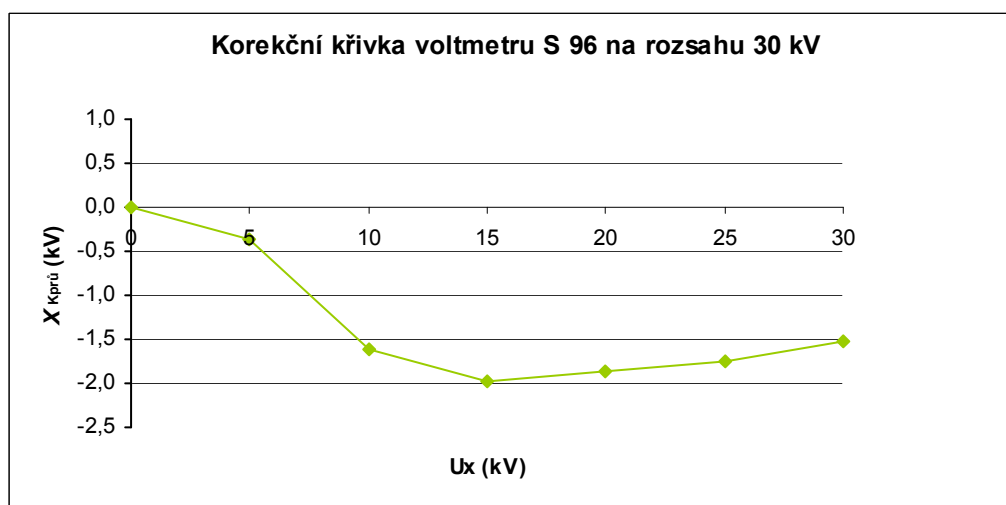
$$U_{NK_{vy}p} = R_p \cdot I_{NK} = 17,71 \cdot 10^6 \cdot 0,960 \cdot 10^{-3} = 17,00 \text{ kV}$$

$$\Delta x_k = U_{NK_{vy}p} - U_x = 17,00 - 15 = 2,00 \text{ kV}$$

$$X_{Kk} = -\Delta x_k = -2,00 \text{ kV}$$

$$X_{Kprů} = \frac{X_{Kv} + X_{Kk}}{2} = \frac{-1,95 + (-2,00)}{2} = -1,98 \text{ kV}$$

$$\delta_x = \frac{|X_{Kprů \max}|}{X_R} \cdot 100 = \frac{|-1,98|}{30} \cdot 100 = 6,6 \% \rightarrow TP > 5$$



Graf č.7: Korekční křivka voltmetru S 96 na rozsahu 30 kV

3.3 Měření na voltmetru LSO 25



Obr. 16 Elektrostatický voltmetr LSO 25 s rozsahem 25 kV

Charakteristické vlastnosti tohoto voltmetru jsou:

- Měří stejnosměrné i střídavé napětí
- Měřicí rozsah 0 – 25 kV
- Číselník má být ve svislé poloze
- Měřicí ústrojí je elektrostatické
- Třída přesnosti pro stejnosměrné i střídavé napětí je 2,5

Tabulka č.9: Naměřené hodnoty voltmetru LSO 25 s rozsahem 25 kV

U _x	Voltmetr LSO 25												
	Měření při napětí												
	vzrůstajícím						klesajícím						X _{Kprů}
	I _{Nv}			U _{Nv_{vy}p}	Δx _v	X _{Kv}	I _{Nk}			U _{Nk_{vy}p}	Δx _k	X _{Kk}	
(kV)	α	k	(mA)	(kV)	(kV)	(kV)	α	k	(mA)	(kV)	(V)	(kV)	(kV)
0	0,0	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	22,5	0,01	0,225	3,98	-1,02	1,02	22,2	0,01	0,222	3,93	-1,07	1,07	1,04
10	62,3	0,01	0,623	11,03	1,03	-1,03	62,0	0,01	0,620	10,98	0,98	-0,98	-1,01
15	91,5	0,01	0,915	16,20	1,20	-1,20	91,0	0,01	0,910	16,12	1,12	-1,12	-1,16
20	12,0	0,1	1,200	21,25	1,25	-1,25	11,90	0,1	1,19	21,07	1,07	-1,07	-1,16
25	15,5	0,1	1,550	27,45	2,45	-2,45	15,50	0,1	1,55	27,45	2,45	-2,45	-2,45

Příklad výpočtu pro 6. řádek tabulky:

$$I_{Nv} = \alpha \cdot k = 15,5 \cdot 0,1 = 1,55 \text{ mA}$$

$$U_{Nv_{vy}p} = R_p \cdot I_{Nv} = 17,71 \cdot 10^6 \cdot 1,55 \cdot 10^{-3} = 27,45 \text{ kV}$$

$$\Delta x_v = U_{Nv_{vy}p} - U_x = 27,45 - 25 = 2,45 \text{ kV}$$

$$X_{Kv} = -\Delta x_v = -2,45 \text{ kV}$$

$$I_{Nk} = \alpha \cdot k = 15,5 \cdot 0,1 = 1,55 \text{ mA}$$

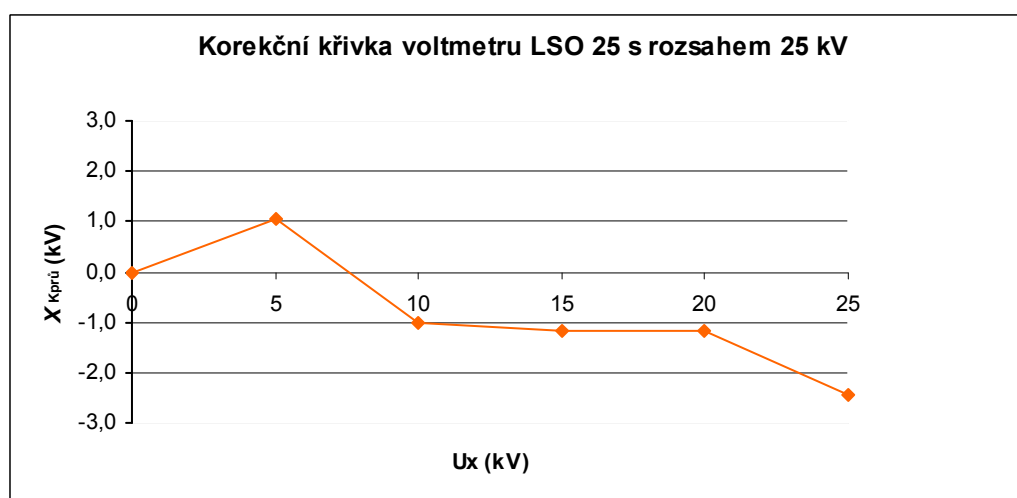
$$U_{Nk_{vy}p} = R_p \cdot I_{Nk} = 17,71 \cdot 10^6 \cdot 1,55 \cdot 10^{-3} = 27,45 \text{ kV}$$

$$\Delta x_k = U_{Nk_{vy}p} - U_x = 27,45 - 25 = 2,45 \text{ kV}$$

$$X_{Kk} = -\Delta x_k = -2,45 \text{ kV}$$

$$X_{Kprů} = \frac{X_{Kv} + X_{Kk}}{2} = \frac{-2,45 + (-2,45)}{2} = -2,45 \text{ kV}$$

$$\delta_{X\%} = \frac{|X_{Kprů \max}|}{X_R} \cdot 100 = \frac{|-2,45|}{25} \cdot 100 = 9,8 \% \rightarrow TP > 5$$



Graf č.8: Korekční křivka voltmetru LSO 25 s rozsahem 25 kV

4 Zhodnocení naměřených výsledků

Provedl jsem kontrolní měření elektrostatických voltmetrů S 96, švýcarského Thrub-Täuber a voltmetru LSO 25.

Jako první jsem kontroloval voltmetr Thrub-Täuber. Měření proběhlo na všech rozsazích předloženého přístroje tj. na 6 kV, 15 kV a 30 kV. Změřením rozsahu 6 kV nám vyšla jako největší hodnota průměrné korekce $X_{Kpru\ max} = -1,46$ kV při napětí 5 kV. U tohoto přístroje se jednotlivé měřicí rozsahy nastavují pomocí přiložených měrek. Z tohoto důvodu jsem se pro porovnání rozhodl provést měření po znovunastavení rozsahu 6 kV. Největší hodnota výsledné korekce vyšla $X_{Kpru\ max} = -1,55$ kV při napětí 5 kV. I srovnání průběžných korekcí pro jednotlivé kontrolované hodnoty nastavovaného napětí vykazují odchylky. Z naměřených výsledků je vidět vliv znovunastavení rozsahu na výsledky měření. Další kontrolovaný rozsah byl 15 kV. Na tomto rozsahu je největší průměrná korekce $X_{Kpru\ max} = -1,78$ kV při napětí 10 kV. Poslední kontrolovaný rozsah 30 kV vykazoval největší průměrnou korekci $X_{Kpru\ max} = -2,45$ kV při hodnotě 25 kV. Z toho největší vypočtená relativní chyba $\delta x = 8,16$ %, což je mimo řadu normovaných tříd přesnosti. Na rozsazích 6 kV a 30 kV nepodařilo nastavit maximální velikost napětí přístroje na stupnici. Světelná stopa se nejspíš z mechanických příčin již dál nepohybovala. U toho přístroje nemáme k dispozici dokumentaci a nemá uvedenu ani třídu přesnosti, z čehož vyplývá, že je vhodný pouze k orientačnímu měření.

Druhým kontrolovaným přístrojem je voltmetr S 96. Měření proběhlo na všech rozsazích přístroje tj. 7,5 kV, 15 kV a 30 kV. Změřením rozsahu 7,5 kV nám vyšla jako největší hodnota průměrné korekce $X_{Kpru\ max} = -0,62$ kV při napětí 7 kV. Další kontrolovaný rozsah byl 15 kV a na tomto rozsahu je největší průměrná korekce $X_{Kpru\ max} = -1,47$ kV při napětí 15 kV. Poslední kontrolovaný rozsah 30 kV vykazoval největší průměrnou korekci $X_{Kpru\ max} = -1,98$ kV při hodnotě napětí 15 kV. Největší vypočtená relativní chyba $\delta x = 6,6$ % a z ní vypočtená hodnota třídy přesnosti je mimo řadu normovaných tříd. Voltmetr S 96 by měl spadat do třídy přesnosti 1,5.

Třetím kontrolovaným přístrojem je voltmetr LSO 25 s jedním rozsahem 25 kV. Z naměřených hodnot vychází jako největší hodnota průměrné korekce $X_{Kpru\ max} = -2,45$ kV při napětí 25 kV. Největší vypočtená relativní chyba $\delta x = 9,8$ % a z ní vypočtená hodnota třídy přesnosti je mimo řadu normovaných tříd. Přístroj má udanou třídu přesnosti pro měření stejnosměrných a střídavých napětí 2,5. Při měření s tímto voltmetrem se výrazně projevilo jeho malé tlumení, které znepříjemňovalo nastavování napětí.

Možné rozdíly ve vypočtených a skutečných hodnotách mohou být způsobeny stářím přístrojů a také možnou závadou, která mohla vzniknout např. neopatrným zacházením. Elektrostatické přístroje jsou velmi jemné a citlivé.

5 Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce byla kontrola a určení tříd přesnosti předložených voltmetrů LSO 25, S 96 a Thrub-Täuber.

Teoretická část se zaměřuje na obecnou charakteristiku elektrostatických přístrojů. Popisuje jejich základní principiální uspořádání a vlastnosti, kterými tyto přístroje disponují. Měřicí ústrojí elektrostatických voltmetrů je tvořeno soustavou pevných a pohyblivých elektrod, které tvoří kondenzátor. Připojením napětí se zvětší energie kondenzátoru a silovým účinkem pole dojde k vychýlení elektrody. Elektrická energie se mění na mechanickou energii a energii pole. Za zmínku stojí, především to, že tyto přístroje z elektrického pole odebírají velmi malou energii čímž je jejich spotřeba téměř zanedbatelně malá. Zejména rotační voltmetry nezatěžují zdroj vůbec, protože jejich energie potřebná k dosažení výchylky přístroje se odebírá z pomocného zdroje.

Absolutní voltmetry nazýváme přístroje, u kterých je možné velikost elektrostatické veličiny určit ze základních fyzikálních veličin např. délky, síly a jako příklad jsou uvedeny Thomsonovy váhy a Černyševův voltmetr. Dále zde uvádím voltmetry s přímým odečítáním měřené veličiny, které indikují pomocí výchylky ručky nebo jiným způsobem přímo měřené napětí. Princip těchto voltmetrů popisují voltmetr Starke-Schröder a Kvadrantový voltmetr.

Protože přímé odečítání výchylky vysokonapětových elektrostatických voltmetrů má nevýhodu, že při odečítání vyšších napětí už musí být pozorovatel kvůli bezpečnosti značně vzdálen od přístroje využíváme voltmetry s elektrickým přenosem měřené veličiny jako je voltmetr Rogowského a Böckera.

Samostatnou skupinou jsou Rotační kotoučový a Rotační válcový voltmetr. Jejich činnost není na rozdíl od výše popsanych voltmetrů založena na silových účincích elektrického pole. Pro měření napětí využívají elektrostatickou indukci.

Poslední skupinou jsou vibrační voltmetry s pohybující se elektrodou. Změna kapacity je u vibračních voltmetrů vyvolána kmitavým pohybem měřicí elektrody směrem k vysokonapětové elektrodě. Tyto přístroje jsou vhodné pouze na měření stejnosměrných vysokých napětí.

Z naměřených a vypočtených hodnot jsem zjistil, že předložené přístroje nespádají do uvedených tříd přesnosti. Toto zjištění bylo důležité především u voltmetru Thrub-Täuber, který je v laboratoři TVN nový a navíc nemá technickou dokumentaci. Tento přístroj je vhodný pouze pro informativní měření.

U přístroje S 96 a LSO 25 by bylo vhodné provést cejchování a případnou opravu. Měření mohlo být také ovlivněno tím, že jsem jako kontrolní použil přístroj DU20, jehož třída přesnosti je 1, což nesplňuje podmínku, že kontrolní přístroj by měl mít třídu přesnosti o dvě třídy vyšší než ověřovaný přístroj, ale musel jsem vycházet z dostupného vybavení laboratoře TVN.

6 Literatura

- [1] *Elektrotechnická měření*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-022-9.
- [2] GÁBRIŠ, Ing. František. *Elektrostatické zariadenia*. 1. vyd. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1962. ISBN 621.319.
- [3] MACH, Věslav. *Technika vysokého napětí*. 2. přepracované vydání. Ostrava: ES VŠB-TUO, 2006, 114 s. ISBN 80-248-1161-8.

7 Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Měřicí ústrojí elektrostatického přístroje [1]</i>	2
<i>Obr. 2 Thomsonovy váhy [2]</i>	5
<i>Obr. 3 Černyševův voltmetr [2]</i>	6
<i>Obr. 4 Kvadrantový voltmetr [2]</i>	7
<i>Obr. 5 Voltmetr Starke-Schröderův [2]</i>	8
<i>Obr. 6 Voltmetr Rogowského a Böckera [2]</i>	9
<i>Obr. 7 Časový průběh kapacity a napětí rotačního voltmetru [2]</i>	10
<i>Obr. 8 Válcový rotační voltmetr [2]</i>	12
<i>Obr. 9 Kotoučový rotační voltmetr [2]</i>	13
<i>Obr. 10 Vibrační voltmetr [2]</i>	14
<i>Obr. 11 Paralelní připojení přesného voltmetru ke kontrolovanému [1]</i>	16
<i>Obr. 12 Reálné zapojení ampérmetru a kontrolovaného voltmetru</i>	18
<i>Obr. 13 Voltmetr Thrub-Täuber s rozsahem 30 kV</i>	20
<i>Obr. 14 Nastavení rozsahu 6 kV voltmetru Thrub-Täuber</i>	20
<i>Obr. 15 Elektrostatický voltmetr S 96 s rozsahem 30 kV</i>	25
<i>Obr. 16 Elektrostatický voltmetr LSO 25 s rozsahem 25 kV</i>	29

8 Seznam tabulek

<i>Tabulka č.1: Měření odporů R_p</i>	19
<i>Tabulka č.2: Naměřené hodnoty voltmetru Thrub-Täuber na rozsahu 6 kV</i>	21
<i>Tabulka č.3: Naměřené hodnoty voltmetru Thrub-Täuber na rozsahu 6 kV - druhé měření</i>	22
<i>Tabulka č.4: Naměřené hodnoty voltmetru Thrub-Täuber na rozsahu 15 kV</i>	23
<i>Tabulka č.5: Naměřené hodnoty voltmetru Thrub-Täuber na rozsahu 30 kV</i>	24
<i>Tabulka č.6: Naměřené hodnoty voltmetru S 96 na rozsahu 7,5 kV</i>	26
<i>Tabulka č.7: Naměřené hodnoty voltmetru S 96 na rozsahu 15 kV</i>	27
<i>Tabulka č.8: Naměřené hodnoty voltmetru S 96 na rozsahu 30 kV</i>	28
<i>Tabulka č.9: Naměřené hodnoty voltmetru LSO 25 s rozsahem 25 kV</i>	30

9 Seznam grafů

<i>Graf č.1: Korekční křivka voltmetru Thrub-Täuber na rozsahu 6 kV.....</i>	<i>21</i>
<i>Graf č.2: Korekční křivka voltmetru Thrub-Täuber na rozsahu 6 kV - druhé měření.....</i>	<i>22</i>
<i>Graf č.3: Korekční křivka voltmetru Thrub-Täuber na rozsahu 15 kV.....</i>	<i>23</i>
<i>Graf č.4: Korekční křivka voltmetru Thrub-Täuber na rozsahu 30 kV.....</i>	<i>24</i>
<i>Graf č.5: Korekční křivka voltmetru S 96 na rozsahu 7,5 kV.....</i>	<i>26</i>
<i>Graf č.6: Korekční křivka voltmetru S 96 na rozsahu 15 kV.....</i>	<i>27</i>
<i>Graf č.7: Korekční křivka voltmetru S 96 na rozsahu 30 kV.....</i>	<i>28</i>
<i>Graf č.8: Korekční křivka voltmetru LSO 25 s rozsahem 25 kV.....</i>	<i>30</i>